

<https://helda.helsinki.fi>

Ojituksen vaikutus maaperän kasvihuonekaasupäästöihin

Ojanen, Paavo

2020

Ojanen , P , Minkkinen , K & Regina , K 2020 , ' Ojituksen vaikutus maaperän kasvihuonekaasupäästöihin ' , Suo , Vuosikerta. 71 , Nro 2 , Sivut 173-188 . <
<http://www.suoseura.fi/ojitettujen-soiden-kestava-kaytto/ojituksen-vaikutus-maaperan-kasvihuonekaasupaastoihin/>
>

<http://hdl.handle.net/10138/332566>

cc_by_sa
publishedVersion

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Please cite the original version.

✎ Ojituksen vaikutus maaperän kasvihuonekaasupäästöihin

Paavo Ojanen, Kari Minkkinen & Kristiina Regina

*Paavo Ojanen, Helsingin yliopisto, paavo.ojanen@helsinki.fi;
Kari Minkkinen, Helsingin yliopisto, kari.minkkinen@helsinki.fi;
Kristiina Regina, Luonnonvarakeskus, kristiina.regina@luke.fi*

Johdanto

Luonnontilaisten (ojittamattomien) soiden ja eri tarkoituksiin käytettyjen ojitettujen soiden maaperän kasvihuonekaasupäästöt poikkeavat huomattavasti toisistaan. Ojittamattomat suot kerryttävät turvetta ja ovat hiilidioksidin nieluja, mutta toisaalta myös metaanin lähteitä. Ojitetuilla soilla metaanipäästö on pieni, mutta hapellisen hajotustoiminnan kiihtyminen johtaa yleensä turpeen hävikkiin. Tällöin soista tulee hiilidioksidin ja typpioksiduulin lähteitä. Päästöjen suuruuteen vaikuttavat voimakkaasti maankäyttömuoto ja kuivatuksen tehokkuus.

Seuraavassa tarkastellaan soiden eri maankäyttömuotojen pinta-alakohtaisia kasvihuonekaasupäästöjä pääasiassa Suomesta kerättyjen julkaistujen aineistojen perusteella. Eri maankäyttömuotoja verrataan keskenään. Lisäksi tarkastellaan, miten ojitettujen soiden päästöt eroavat saman maankäyttömuodon kivennäismaiden päästöistä.

Ojituksen vaikutuksia tarkastellaan vertaamalla ojitettua suota ojittamattomaan. Ojittamattomat suot eivät välttämättä ole luonnontilaisia, vaan ihmisen toiminta – vähiten marjanpoiminta, metsästyks ja muu ulkoilu, merkittävimmin sarojen korjuu rehuksi aikoinaan ja metsätalous nykyään – on vaikuttanut niihinkin. Niin kauan kuin suon käyttö ei vaikuta merkittävästi sen hydrologiaan,

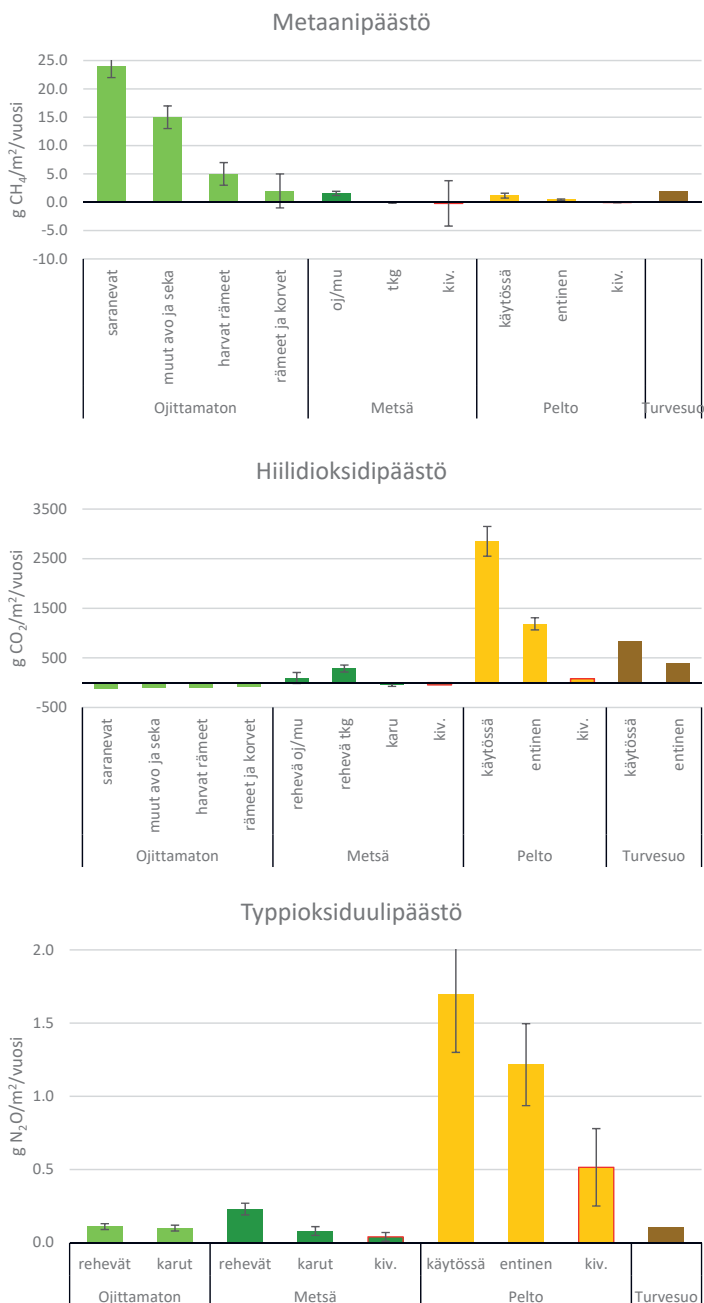
ojittamattoman suon maaperä on kuitenkin aineiden kierroltaan luonnontilaisen kaltainen. Niinpä ojittamaton ja luonnontilainen suo ovat maaperän kasvihuonekaasupäästöjen kannalta seuraavassa käytännössä synonyymejä.

Jos kuitenkin läheisyydessä tehty ojitus muuttaa ojittamattoman suon tai suonosan hydrologiaa, maaperän kaasupäästötkin voivat muuttua. Jos taas suo on käytännössä ojitettu – esimerkiksi ojitusmätästyksellä päätehakkuun jälkeen – vaikka se ei olisikaan ”virallisesti” ojitettu suo, se on yhtä kaikki ojitettu.

Ojittamaton suo

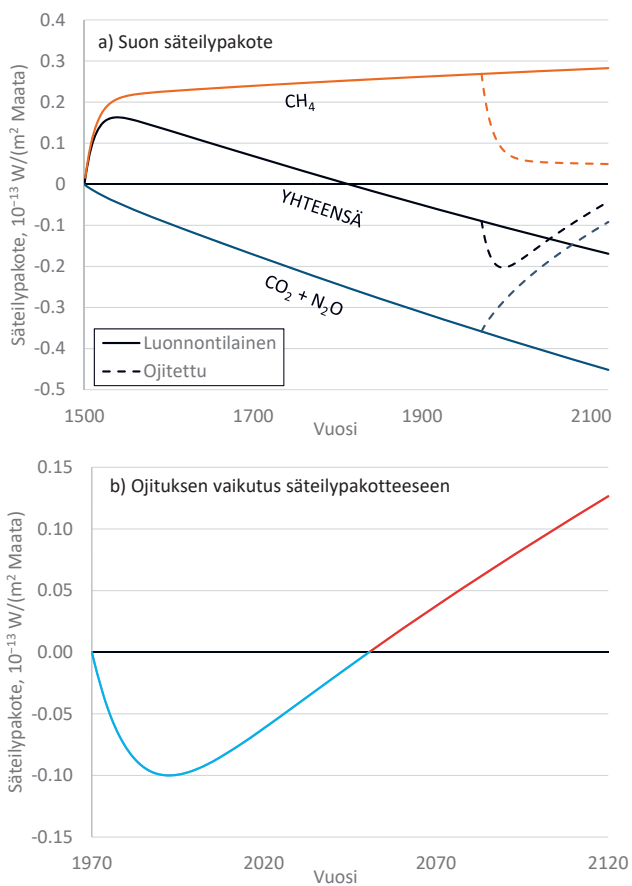
Luonnontilaiset suot ovat hiilidioksidin nieluja turpeen kertymisen takia (kuva 1). Nielu johtuu siitä, että yhteytyksessä orgaaniseen aineeseen sitoutunutta, ilmakehän hiilidioksidista peräisin oleva hiiltä päätyy karikkeena maahan. Hajottajat eivät maaperän hapettomissa oloissa pysty hajottamaan kariketta kokonaan, vaan pieni osa siitä kertyy turpeeksi. Turpeen kertymisnopeus vaihtelee suotyypin mukaan: karut suot kerryttävät turvetta ja hiiltä noin kolmanneksen nopeammin kuin rehevät suot, koska suurempi osa karikkeesta jää hajoamatta (taulukko 1; Turunen ym. 2002).

Luonnontilaiset suot ovat maaperän hapettomien olosuhteiden takia myös metaanin lähteitä: Hapettomissa olosuhteissa hajotuksen yhtenä



Kuva 1. Ojittamattomien ja ojitetun soiden maaperän kasvihuonekaasujen nielujen (–) ja lähteiden (+) suuruudet (\pm keskihajonta). Aineisto: ks. taulukko 2. Metsä = ojitettu metsätalouteen, Pelto = ojitettu maatalouteen, Turvesuo = ojitettu turpeennostoon. Vertailun vuoksi on esitetty myös kivennäismaiden (kiv.) metsien ja peltojen kaasutaset. oj/mu = ojikko/muuttuma, tkg = turvekangas, rehevät = ruoho- ja mustikkaturvekankaita vastaavat suot, karu = puolukka-, varpu- ja jäkäläturvekankaita vastaavat suot. Entiset pellot sisältävät metsitetyt ja metsittyneet pellot sekä ruohikkoalueeksi jääneet hylätyt pellot. Entiset turvesuot ovat soita, joilta turve on nostettu ohutta jäännösturvekerrosta lukuun ottamatta tai jotka ovat olleet vuosikausia hylättyinä metsittymättöminä kenttinä. Turvesuoilla on päästössä mukana vain paikan päällä saroilta ja ojista vapautuvat päästöt. Korjattavan turpeen käytöstä aiheutuvat päästöt ovat noin kymmenkertaiset (Juutinen ym. 2019).

Kuva 2. a) Esimerkki luonnontilaisen suon maaperän hiilidioksidinielun (CO_2), typpioksiduulipäästön (N_2O) ja metaanipäästön (CH_4) 620 vuoden aikana aiheuttamasta säteilypakotteesta (+ ilmastoa lämmittävä vaikutus, – ilmastoa viilentävä vaikutus). Suo syntyy vuonna 1500. Katkoviivalla on esitetty vaihtoehtoinen kehitys, jossa suo ojitetaan vuonna 1970. Tällöin metaanipäästö loppuu, mutta toisaalta hiilidioksidinielu muuttuu päästökseksi ja typpioksiduulipäästö kasvaa. b) Ojituksen vaikutus säteilypakotteeseen (= ojitetun suon säteilypakote – luonnontilaisen suon säteilypakote). Säteilypakotteen laskemiseen käytetyt maaperän CO_2 -, N_2O - ja CH_4 -taseet (+ päästö, – nielu) eivät kuvaa mitään tiettyä suota tai suotyyppiä, mutta ovat kuitenkin realistisia arvoja borealiselle luonnontilaiselle ja metsäojitetulle suolle: luonnontilainen -130 , $+7$, $+0.1$ $\text{g/m}^2/\text{vuosi}$; ojitettu $+130$, ± 0 , $+0.2$ $\text{g/m}^2/\text{vuosi}$. Säteilypakotteen laskeminen, ks. Menetelmät.



lopputuotteena on metaani. Metaani kulkeutuu hapettomasta turvekerroksesta diffuusiolla pienempää pitoisuutta kohti, eli kohti turpeen pintaa ja ilmakehää. Turpeen hapellisessa pintakerroksessa ja sammalissa elää mikrobeja, jotka hapettavat metaania hiilidioksidiksi. Koska hapellinen kerros on luonnontilaisella suolla ohut, mikrobit eivät kuitenkaan ehdi hapettaa kaikkea metaania ennen sen pääsyä ilmakehään. Metaania pääsee maasta ilmakehään myös hapettomiin oloihin sopeutuneiden kasvien, erityisesti sarojen kautta. Sarat kuljettavat happea juurilleen tuuletus-solukon kautta, ja samaa tuuletussolukkoa pitkin kulkeutuu metaania maaperästä ilmakehään. Metaanipäästö vaihtelee voimakkaasti suon märkyyden ja ravinteisuuden mukaan (Minkkinen & Ojanen 2013, s. 81). Eniten metaania päästävien vetisten, saraisten avosoiden päästöt ovat yli kymmenkertaiset verrattuna kuivempien aitojen korpien ja rämeiden päästöihin (kuva 1).

Luonnontilaiset suot ovat hyvin pieniä typpioksiduulin lähteitä suotyyppistä riippumatta (kuva 1; Martikainen ym. 1993, Regina ym. 1996, Leppelt ym. 2014, Minkkinen ym. 2020). Vaikka erityisesti märillä ja rehevillä soilla on paljon orgaanista typpeä, hapettomat olosuhteet estävät tehokkaasti sen vapautumisen turpeesta (mineralisoitumisen), ja typpioksiduulin päästö jää pieneksi.

Metaanipäästön takia luonnontilaiset suot ovat lämmittäneet ilmakehää kehityksensä alussa (kuva 2; Frolicking ym. 2006, Frolicking & Roulet 2007, Mathijssen ym. 2014, 2017). Tämä johtuu siitä, että metaani on paljon hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu (taulukko 3). Lisäksi suot levittäytyvät vuosisatojen ja -tuhansien mitaan viereisille alaville alueille, jolloin metaania päästävä pinta-ala vähitellen suurenee (Mathijssen ym. 2014, 2017). Keidassoilla metaanipäästö voi lopulta alkaa vähentyä, kun suon kasvaessa

paksuutta sen keskiosat karuuntuvat (Mathijssen ym. 2017). Aapasoilla sen sijaan metaanipäästö ei yleensä vähene ajan myötä, koska märkä, sarojen vallitsema pinta pysyy vallitsevana (Mathijssen ym. 2014).

Koska metaani hajoaa nopeasti ilmakehässä (taulukko 3), sen lämmittävä vaikutus tasaantuu muutamassa kymmenessä vuodessa, jos metaanipäästö ei enää lisäännä (kuva 2). Hiilidioksidinielun vaikutus taas on hyvin pitkäaikainen, koska hiilidioksidi ei hajoa ilmakehässä. Biologiset ja geologiset prosessit poistavat sitä ilmakehästä hyvin hitaasti. Satojen tai tuhansien vuosien kuluessa turvetta kertyy suohon niin paljon, että hiilidioksidinielun viilentävä vaikutus kasvaa metaanilähteen lämmittävää vaikutusta suuremmaksi (kuva 2). Vanha suo on siten kehityksensä aikana viilentänyt ilmastoa (Frolking ym. 2006, Frolking & Roulet 2007, Mathijssen ym. 2014), mutta joskus viilentävän vaikutuksen alkuun on voinut kulua jopa useita tuhansia vuosia (Mathijssen ym. 2017).

Suuri osa Suomen ojittamattomasta suopinta-alasta on soilla, joiden reunaosia on ojitettu (Rehell 2017, Sallinen ym. 2019). Keidassoiden ombrotrofisiin keskiosiin reunaosien ojitus ei yleensä vaikuta, koska keskiosat ovat täysin luonnontilaisellakin suolla saaneet vetensä vain sateesta. Aapasoilla sen sijaan reunaosan ojitus vähentää tehokkaasti veden valumista suon keskiosaan. Tällöin ojitetun reunan lisäksi suon ojitamaton keskiosakin kuivuu, ja aapasoilte tyypillinen märkä, sarojen vallitsema pinta alkaa kehittyä karummaksi ja kuivemmaksi rahkasammalten vallitsemaksi pinnaksi (Tahvanainen 2011, Rehell 2017). Koska suon karuuntuminen ja kuivuminen yleensä vähentää metaanipäästöä ja lisää turpeen kertymistä, aapasoiden ojitamattomien osien maltillisella kuivumisella on todennäköisesti ilmastoa viilentävä vaikutus.

Ojitettu suo

Eri maankäyttömuotojen päästöt

Suon ojitaminen pienentää metaanipäästöä mutta suurentaa hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästöjä (kuva 1). Metaanipäästö maaperästä käytännössä loppuu, kun metsäojitettu suo kuivuu niin tehok-

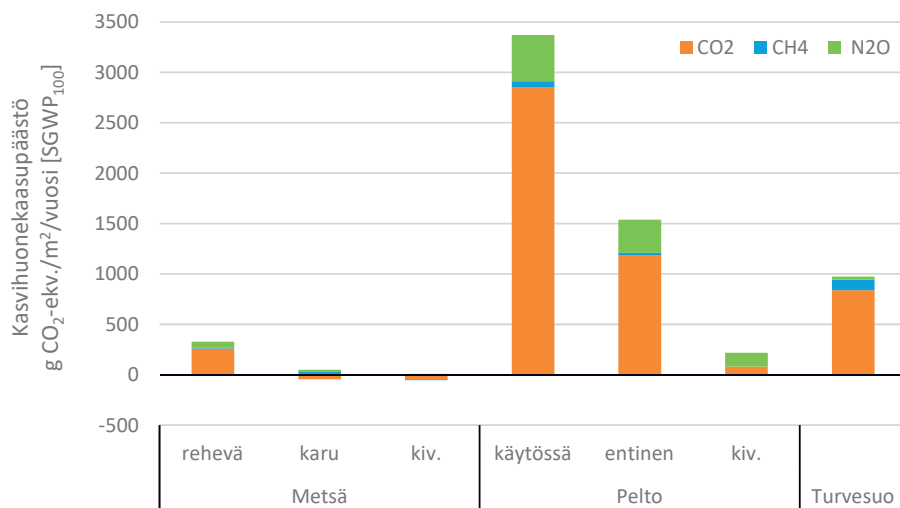
kaasti, että se kehittyy turvekangasasteelle. Samoin tehokkaasti kuivattujen peltojen ja turpeenottoalueiden maaperä ei päästä metaania. Ojikko- ja muuttuma-asteen metsäojitetut suot ovat melko märkiä ja päästävät siksi metaania. Ojista pääsee metaania ilmakehään, mutta metsäojitusalueilla ojien pinta-ala on suhteellisen pieni, toisin kuin turpeenottoalueilla, jossa metaania päästäviä ojia on paljon tiheämmin. Peltojen ja entisten peltojen metaanipäästö johtuu suuripäästöisistä avo-ojista, vaikka avo-ojien keskimääräinen osuus pinta-alasta onkin salaojituksen takia hyvin pieni.

Hiilidioksidi- ja typpioksiduulipäästö kulkevat käsi kädessä (kuva 1), koska ne molemmat ovat seurausta mikrobien kiihtyneestä hajotustoiminnan aiheuttamasta turpeen hävikistä: Maaperän mikrobien hajottaessa turvetta siihen sitoutunut hiili vapautuu mikrobien hengityksessä hiilidioksidina ilmakehään. Turpeeseen sitoutunut orgaanista tyyppiä vapautuu (mineralisoituu) hajotuksessa maaperään erilaisina typpiyhdisteinä, kuten ammoniumina ja nitraattina. Maaperän mikrobit hapettavat ja pelkistävät näitä liukoisia typpiyhdisteitä, jolloin osa tuestä vapautuu typpioksiduulina ilmakehään.

Turpeen hävikki on sitä nopeampaa mitä paremmat olosuhteet hajottajamikrobeilla on maaperässä. Hajottajien toimintaa edistävät sopiva kosteus, ravinteiden ja hapen hyvä saatavuus sekä vähäinen happamuus. Tämä selittää, miksi tehokkaasti ojitetuilla ja säännöllisesti muokatuilla, lannoitetuilla ja kalkituilla pelloilla turpeen hävikki on monin verroin nopeampaa kuin metsäojitetuilla soilla (kuva 1).

Pellocksi raivatun suon jäädessä pois maatalouskäytöstä se metsitetään, metsittyä itsestään tai jää puuttomaksi ruohostoksi (Mäkiranta ym. 2007, Maljanen ym. 2013). Vaikka hylättyjen ja metsitettyjen peltojen päästöt ovat pienemmät kuin käytössä olevien, ne ovat vuosikymmeniä huomattavasti suuremmat kuin metsäojitetttujen soiden (Kuvat 1 ja 3). Peltojen tehokkaan ojituksen ja maanparannuksen vaikutukset näkyvät pitkään maatalouskäytön loputtuakin.

Metsäojitetuilla soilla turpeen hävikki riippuu kasvupaikan rehevyydestä ja vedenpinnan syvyydestä (kuvat 1 ja 4). Rehevillä kasvupaikoilla (ruoho- ja mustikkaturvekankaat) turpeen hävikki on huomattavaa, ja se on selvästi suurempaa



Kuva 3. Ojitettujen turvemaiden eri maankäyttöjen ja vastaavien kivennäismaiden keskimääräiset maaperän kasvihuonekaasutaseet (ks. kuva 1) hiilidioksidiekvivalentteina. Metsäojitettujen soiden päästöt ovat ojikkojen/muuttumien ja turvekankaiden pinta-aloilla Valtakunnan metsien 12. inventoinnin tulosten perusteella painotettuja keskiarvoja (rehevät: 14,4 % ojikkoja ja muuttumia, karut: 37,6 % ojikkoja ja muuttumia). Metaanille (CH₄) ja typpioksiduulille (N₂O) on käytetty muuntokertoimina jatkuvan päästön sadan vuoden ilmastovaikutuksen kertoimia (SGWP₁₀₀; CH₄: 54 g CO₂-ekv./g CH₄, N₂O: 270 g CO₂-ekv./g N₂O; ks. Menetelmät).

tehokkaasti kuivuneilla turvekangasasteen soilla kuin märemmiksi jääneillä ojikoilla ja muuttumilla. Karuilla kasvupaikoilla (puolukka-, varpu- ja jäkäläturvekankaat) ei keskimäärin ole turpeen hävikkiä, mutta niilläkin tarpeeksi tehokas kuivatus johtaa hävikkiin. Ojikko-muuttuma-turvekangas-luokittelu (Laine ym. 2018) ei kuitenkaan kykene erottelemaan karuja soita hävikillisiin ja hävikittömiin.

Karut metsäojitetut suot, joilla ei keskimäärin ole suurta turpeen hävikkiä, ovat päästöiltään samankaltaisia kuin kivennäismaiden metsät (kuvat 1 ja 3): maaperä voi maltillisella ojituksella olla kivennäismaan tapaan pieni hiilidioksidin nielu ja typpioksiduulipäästö on samanlainen kuin ojittamattomalla suolla (kuva 4). Siten karut metsäojitetut suot ovat päästöiltään erikoistapaus ojitettujen soiden joukossa. Muissa tapauksissa ojitus johtaa lähes aina merkittävään turpeen hävikkiin (Couwenberg ym. 2010, Hooijer ym. 2010, Hiraishi ym. 2014, Tiemeyer ym. 2016, Lupikis & Lazdins 2017, Bjarnadottir ym. 2021).

Turpeennostoalueiden hiilidioksidipäästöt ovat suuremmat kuin metsäojitettujen soiden (kuva 1), koska alueet ovat tehokkaasti kuivattuja ja niillä ei kasva mitään mikä sitoisi uutta

hiiltä maaperään. Päästöt ovat kuitenkin selvästi pienemmät kuin pelloilla, joita lannoitetaan ja muokataan toistuvasti. Typpioksiduulipäästö on samalla tasolla karujen ojitettujen soiden ja luonnontilaisten soiden kanssa. Kuvassa 1 on mukana vain nostoalueella saroilta ja ojista syntyvät päästöt. Suolta korjattavan turpeen hajoamisesta aiheutuvat päästöt ovat noin kymmenkertaiset nostoalueen päästöihin verrattuna (Juutinen ym. 2019). Kun ne otetaan huomioon, turpeennosto aiheuttaa ojitetun suon eri käyttömuodoista selvästi suurimmat, muihin käyttömuotoihin verrattuna moninkertaiset päästöt.

Ojituksen ilmastovaikutus on periaatteeltaan suon syntymisen vaikutuksen peilikuva (kuva 2): Metaanipäästön pienemisellä on nopeasti tasaantuva viilentävä vaikutus. Hiilidioksidinielun muuttumisella päästökseksi ja typpioksiduulipäästön kasvamisella on ajan myötä koko ajan suureneva lämmittävä vaikutus. Jos turpeen hävikki on hidasta, kuten kuvan 2 tapauksessa, kokonaisvaikutus voi aluksi olla ilmastoa viilentävä. Vähitellen turpeen huvetessa kokonaisvaikutus kehittyy yhä lämmittävämmäksi.

Ilmastovaikutukseltaan suurin merkitys on turpeen hävikin aiheuttamalla hiilidioksidipäästöllä

(kuva 2). Erityisesti pelloilla myös typpioksiduulipäästöillä on merkittävä lämmittävä vaikutus. Metaanipäästön tai -nielun merkitys on vähäinen. Ojitetut turvemaat ovatkin ilmastovaikutuksiltaan kivennäismaiden metsiä ja pelloja huonompia (kuva 1 ja 3) juuri turpeen hävikin aiheuttamien hiilidioksidin- ja typpioksiduulipäästöjen takia. Tässä korostuu ero metsä- ja maatalouden välillä. Metsäojituskin aiheuttaa turpeen hävikkiä, mutta maatalous moninkertaistaa sen. Vaikka maatalous aiheuttaa kivennäismaillakin hiilen hävikkiä ja typpilannoituksen takia typpioksiduulipäästöjä, päästöt ovat turvemailla paljon suuremmat turpeen suurten hiili- ja typpivarastojen takia. Turvemaan raivaaminen pelloksi aiheuttaa moninkertaisesti suuremmat kasvihuonekaasupäästöt kuin kivennäismaan raivaaminen (kuva 3).

Metsäojitettujen soiden ja turvemaan peltojen päästöihin vaikuttavat tekijät

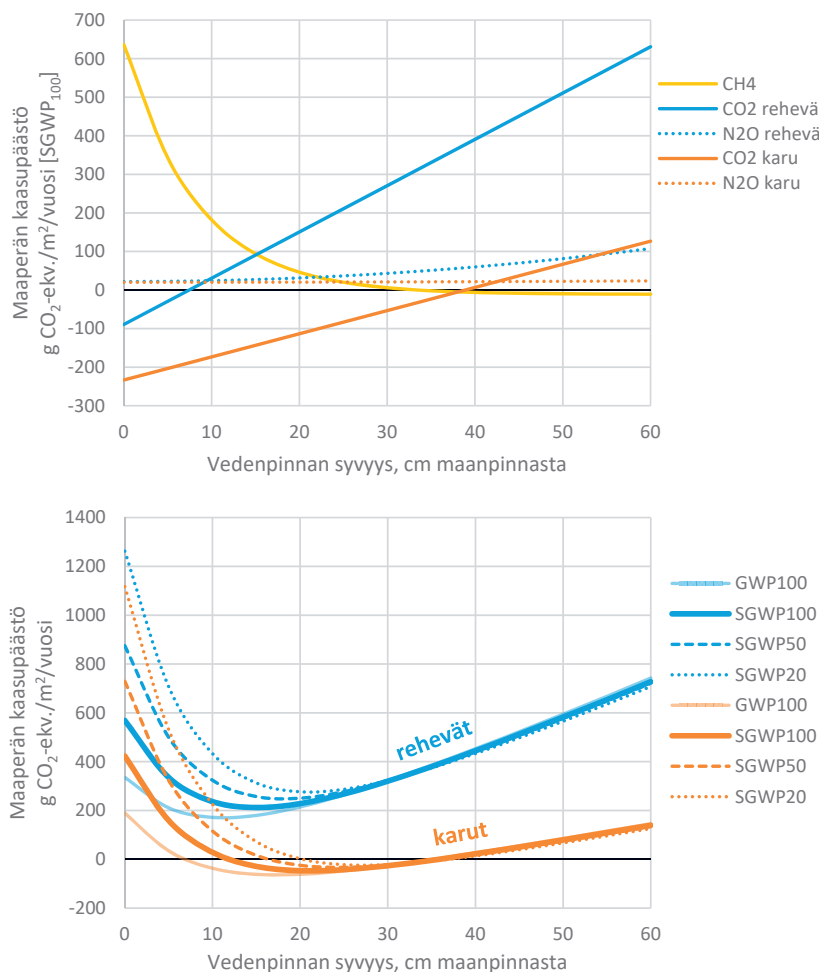
Tarkasteltaessa yksittäistä maankäyttömuotoa, suon maaperän päästöjä säätelee ensisijaisesti vedenpinnan syvyys (Couwenberg ym. 2010, 2011, Hooijer ym. 2010, 2012, Ojanen ym. 2010, Maljanen ym. 2013, Tiemeyer ym. 2016, Ojanen ja Minkkinen 2019, Minkkinen ym. 2020): Mitä syvemmällä vedenpinta on, sitä suurempia hiilidioksidin- ja typpioksiduulipäästöt ovat. Toisaalta metaanipäästö vähenee ja käytännössä loppuu vedenpinnan ollessa yli 30 cm syvyydellä.

Kuvassa 4 on arvioitu vedenpinnan syvyyden vaikutusta metsäojitetun suon maaperän päästöjen ilmastovaikutukseen 20, 50 ja 100 vuoden aikajän-teillä. Vedenpinnan ollessa lähellä maanpintaa (0–20 cm) metaanipäästö vaikuttaa voimakkaasti: lämmittävä ilmastovaikutus pienenee vedenpinnan syvetessä. Tätä kuivemmissa oloissa hiilidioksidipäästö ja rehevillä paikoilla myös typpioksiduulipäästö määrittävät ilmastovaikutuksen: lämmittävä vaikutus kasvaa vedenpinnan syventyessä. Näistä ilmiöistä seuraa, että lämmittävä ilmastovaikutus on pienimmillään rehevillä paikoilla vedenpinnan ollessa 15–20 cm syvyydellä ja karuilla paikoilla vedenpinnan ollessa 20–30 cm syvyydellä. Siten vedenpinta voidaan lämmittävän vaikutuksen vähentämiseksi pitää niin korkealla, kuin se puuston hyvän kasvun kannalta on mahdollista. Puuston kasvu alkaa kärsiä

merkittävästi, jos vedenpinta on korkeammalla kuin 30 cm syvyydessä (Sarkkola ym. 2012). Kuvaa tulkitessa pitää muistaa, että ilmastovaikutus on laskettu korkeintaan 100 vuoden aikajän-teelle. Vielä pidemmillä aikajän-teillä metaanin vaikutus pienenee edelleen, eli lämmittävä ilmastovaikutus on pienimmillään vielä yllä mainittuja korkeammalla vedenpinnalla.

Turvemaan pelloilla vedenpinnan syvyyden vaikutus maaperän päästöihin on samansuuntainen kuin metsäojitetuilla soilla (Maljanen ym. 2013, Regina ym. 2015). Merkittävä metaanipäästö aiheutuu vasta pohjaveden pinnan noustessa 20 cm syvyydelle. Hiilidioksidin- ja typpioksiduulipäästöt kasvavat vedenpinnan syvetessä, mutta kaikkein kuivimmissa oloissa ne voivat jopa alkaa vähetä. Maan kuivuessa hyvin kuivaksi typpioksiduulin tuotto vähenee pelkistymisreaktioiden hidastumisen vuoksi ja kuivuus haittaa myös hajotustoimintaa. Tyypillisillä ojitussyvyyksillä tämän kaltainen tilanne on kuitenkin harvinainen ja voi esiintyä vain pitkän kuivuusjakson aikana. Niinpä turvepellon päästöjen ilmastoa lämmittävä vaikutus on sitä pienempi, mitä korkeammalla pohjaveden pinta pystytään pitämään (Maljanen ym. 2013). Lämmittävä vaikutus kasvaa pohjaveden pinnan syvetessä aina 40–60 cm asti. Tätä syvemmillä vedenpinnoilla vaikutus pysyy suu-rena, vaikka ei välttämättä enää kasva.

Vedenpinnan syvyyden lisäksi turvemaan pellon päästöihin voivat vaikuttaa happamuus, hiili-typpisuhde ja turpeen hiilipitoisuus sekä lannoituksen ja muokkauksen voimakkuus (Maljanen ym. 2010, Leppelt ym. 2014). Yksittäisen tekijän vaikutus on kuitenkin vaikea todentaa nykyään käytettävissä olevan suhteellisen pienen mittausaineiston perusteella. On viitteitä siitä, että muokkauksesta luopuminen suorakylvöön siirtymällä voi vähentää hiilidioksidipäästöjä (Elder & Lal 2008, Regina ym. 2010). Nurmen viljelyssä muokkaus on vähäistä, mutta pohjoisissa oloissa nurmi uusitaan kuitenkin tyypillisesti 3–4 vuoden välein, ja päästöt eivät välttämättä ole alhaisemmat kuin yksivuotisten kasvien viljelyssä (Maljanen ym. 2010): on havaintoja, joiden mukaan nurmien päästöt ovat alhaisemmat (Maljanen ym. 2004, Regina ym. 2004), mutta myös päinvastaisia tuloksia on saatu (Maljanen ym. 2001b, 2003b). Pysyvillä ruohostoilla päästöt



Kuva 4. Rehevien ja karujen metsäojittettujen soiden maaperän kasvihuonekaasupäästöjen riippuvuus lumettoman ajan (touko-lokakuu) keskimääräisestä vedenpinnan syvyydestä. Laskettu Ojanen ym. (2010), Ojanen & Minkkinen (2019) ja Minkkinen ym. (2020) yhtälöiden mukaan ja muutettu yhteismitalliseksi hiilidioksidiekvivalenteiksi SGWP-kertoimilla (ks. taulukko 4). Yläkuvasa on esitetty eri kaasujen päästöt SGWP₁₀₀-kertoimilla ja alakuvassa päästöjen summa eri SGWP-kertoimilla ja vertailun vuoksi tavanomaisilla GWP₁₀₀-kertoimilla. DOC-päästön ja latvussadannan vaikutus hiilidioksidipäästöön ja ojen vaikutus metaanipäästöön on otettu huomioon (ks. Menetelmät).

voivat olla suuruusluokaltaan hylättyjen peltojen päästöjä vastaavat (Hiraishi ym. 2014, Leppelt ym. 2014, Tiemeyer ym. 2016). Tällaisia pysyviä ruohostoja ovat esimerkiksi Keski-Euroopassa yleiset pysyvät laitumet, joita ei lannoiteta, muokata ja ojiteta yhtä voimakkaasti kuin suomalaisia viljelykierrossa olevia nurmia.

Turvemaan pellon suuret päästöt johtuvat pääasiassa mikrobien hajotustoiminnan aiheuttamasta turpeen hävikistä. Turvema muuttuu vähitellen multamaaksi, kun turpeeseen alkaa

turverroksen ohentuessa sekoittua kivennäismaata ja turpeen hiilipitoisuus alenee. Suomessa päästöjen tutkimus on kohdistunut varsinaisille turvemaille, mutta päästöt voivat olla multamailla yhtä korkeita tai jopa korkeampia kuin varsinaisilla turvepelloilla (Tiemeyer ym. 2016, Eickenscheit ym. 2015). Hiilidioksidipäästö ei ole suoraan verrannollinen turpeen hiilipitoisuuteen tai päästö voi jopa kasvaa maatumisen edetessä ja turvemaan muuttuessa multamaaksi (Tiemeyer ym. 2016, Säurich ym. 2019).

Pohdintaa

Jos ojitettujen soiden käyttö jatkuu ennallaan, eli kuivatusta ylläpidetään ja metsätalous, maatalous tai turpeenotto jatkuu, kasvihuonekaasupäästöjen voi olettaa jatkuvan niin pitkään kuin turvetta riittää. Sen jälkeen, kun turvekerroksen sisältämä orgaaninen aine on kokonaan hajonnut, päästöt ovat todennäköisesti kivennäismaiden kaltaiset. Pitkään käytössä olleella turvemaan pellolla turvekerros ohenee tyypillisesti noin yhden senttimetrin vuodessa (Grønlund ym. 2008), kun taas rehevällä metsäojitetulla suolla turpeen vuotuinen hävikki on paljon hitaampaa, enintään muutaman millimetrin luokkaa.

Ilmaston lämpeneminen voi kuitenkin kiihdyttää turpeen hajoamista ja lisätä maaperän hiilidioksid- ja typpioksiduulipäästöjä, vaikka maankäyttö jatkuisi ennallaan. Ilmaston lämpeneminen lämmittää maaperää, ja turpeen hajotus kiihtyy lämpötilan noustessa (Silvola ym. 1996, Mäkiranta ym. 2009, Ojanen ym. 2010). Ilmaston lämpeneminen myös lisää haihduntaa, ja turpeen hävikki on yleensä sitä nopeampaa mitä kuivempi suo on (Maljanen ym. 2013, Ojanen & Minkkinen 2019). Päästöt ovatkin tyypillisesti sitä suuremmat, mitä lämpimämpi ilmasto on (Hiraishi ym. 2014). Lisäksi ilmastonmuutos voi lisätä kesien kuivuutta (Dai 2013, Jolly ym. 2015), mikä kasvattaa turvepalojen riskiä. Boreaalisen vyöhykkeen kuivakesäisillä mantereisilla alueilla turvepalot ovat tavanomaisia jopa ojittamattomilla soilla (Turetsky ym. 2004, Sirin ym. 2018).

Turpeen hävikistä aiheutuvien päästöjen vähentämiseksi ja ilmastonmuutoksen haittojen torjumiseksi soiden kuivatuksen tavoitteita pitää arvioida uudelleen. Sen sijaan että tavoitellaan mahdollisimman tehokasta kuivatusta, soita on pyrittävä hyödyntämään mahdollisimman märkinä. Yksinkertaisimmallaan tämä tarkoittaa tarpeettoman tehokkaan kuivatuksen välttämistä, esimerkiksi kunnostamalla metsäojia, vain kun se on välttämätöntä (Ojanen & Minkkinen 2019), tai nostamalla peltojen pohjaveden pintaa säätösalaajituksen avulla (Regina ym. 2015). Myös kosteikkoviljely, jossa esimerkiksi vetetyllä pellolla kasvatetaan pajua tai marjoja (Kløve ym. 2017) tai vettyneeltä metsäojitusalueelta korjataan rahkasammalta (Silvan ym. 2019), tarjoaa mahdollisuuksia yhdistää märkä suo ja taloudellinen tuotto. Vähäpäästöisillä ojitetuilla soilla, esimerkiksi puuntuotantoon liian karuilla metsäojitusalueilla (Juutinen ym. 2020), on ilmaston kannalta parasta, ettei tehdä yhtään mitään.

Menetelmät

Ojittamattomien ja ojittettujen soiden päästöjen laskentamenetelmät ja -aineistot ovat hyvin erilaiset. Hiilidioksidipäästön (CO_2) laskennassa on täytynyt ottaa eri komponentteja huomioon, koska tässä työssä käytetyissä ojittamattomilla soilla tehdyissä tutkimuksissa on määritetty maaperän pitkän aikavälin hiilitase, mutta ojitetuilla soilla tehdyissä tutkimuksissa on suoraan mitattu CO_2 -vaihtoa. Alla on pääpiirteissään selostettu käytetyt menetelmät.

Taulukko 1. Ojittamattoman suon hiilitaseen komponentit. Hiilinieluna (C-nielu) käytettiin Turusen ym. (2002) pitkän ajan hiilen kertymän (LORCA) soveltuvien luokkien (luokkien numerot suluissa) pinta-alalla painotettua keskiarvoa. Metaanipäästö (CH_4 -päästö, suluissa keskivirhe) Minkkisen ja Ojasen (2013) mukaan ja hiileksi muutettuna ($\text{CH}_4\text{-C}$). C-laskeuma: Lindroos ym. 2007, DOC-päästö: Sallantaus 1994. CO_2 -nielu on laskettu yhtälön 1 mukaan.

Suotyyppi	C-nielu (g C/m ² /vuosi)	CH_4 -päästö (g CH_4 /m ² /vuosi)	$\text{CH}_4\text{-C}$ (g C/m ² /vuosi)	DOC-päästö (g C/m ² /vuosi)	C-laskeuma (g C/m ² /vuosi)	CO_2 -nielu (g CO_2 /m ² /vuosi)
Sara- ja rimpinevat (1)	15,5 (1)	24 (2)	18,0	9,5	0,5	124
Muut avosuot sekä sararämeet ja -korvet (2)	16,1 (2,5,6)	15 (2)	11,2	9,5	0,5	102
Muut harva-puustoiset rämeet (3)	22,1 (7,8)	5 (2)	3,7	9,5	0,5	96
Aidot puustoiset korvet ja rämeet (4)	23,0 (1,3)	2 (3)	1,5	9,5	0,5	91

Taulukko 2. Ojittamatonien ja ojittujen soiden sekä kivennäismaiden keskimääräiset maaperän kaasupäästöt (g kaasua/ m^2 /vuosi, negatiivinen päästö tarkoittaa nielua) ja työssä käytetyt lähteet. n = kocalojen lukumäärä (sarka/oja), kv. = keskivirhe. Pello = viljan tai nurmen viljely, turvesuo = turpeemostonalteen sarat + sarkaogat, oj/mu = ojjikko/muuttuma, tkg = turvekanngas, rehevä = ruoho- ja mustikkaturvekankaat, karu = puolukka-, varpu- ja jäkälaturvekankaat, kiv. = kivennäismaa. Entisiin peltoihin kuuluvat sekä ruohikkotaluiksi jääneet että metsistyneet ja metsietyt entiset pellot. Entiset turvesuot ovat alueita, jotka eivät ole vettynneet tai siirtyneet pelloiksi tai metsiksi.

Maankäyttö	CO ₂ -päästö	kv	n	Huom	Lähteet
	saranevat	-124			Turunen ym. 2002
Ojittamaton suo	muut avo ja seka harvat rämeet	-102 -96			Turunen ym. 2002 Turunen ym. 2002
	rämeet ja korvet	-91			Turunen ym. 2002
Metsäojitettu	rehevä oj/mu rehevä tkg	95 285	110 70	9 28	Ojanen & Minkkinen 2019 Ojanen & Minkkinen 2019 Ojanen & Minkkinen 2019
	karu	-45	30	39	
Metsä	kiv.	-45			Tilastokeskus 2019 (2008-2017)
Turvermaan pelto	käytössä entinen	2850 1187	300 122	8 6	Lohila ym. 2004, Maljanen ym. 2001b, 2004 Maljanen ym. 2013, Lohila ym. 2007
Pello	kiv.	79			Heikkinen ym. 2013
Turvesuo	käytössä entinen	839 394		ojat 7 %, sarka 93 % 2/- ojat 7 %, sarka 93 %	Pohjala 2014 Tuittila ym. 1999, Shurpalli ym. 2008, Pohjala 2014 (ojat)
Maankäyttö	CH ₄ -päästö	kv	n	Huom	Lähteet
	saranevat	24	2	20	Minkkinen & Ojanen 2013
Ojittamaton suo	muut avo ja seka harvat rämeet	15 5	2 2	32 22	Minkkinen & Ojanen 2013 Minkkinen & Ojanen 2013
	rämeet ja korvet	2	3	7	Minkkinen & Ojanen 2013
Metsäojitettu	oj/mu tkg	1,56 -0,09	0,37 0,08	41/21 ojat 2,5 % 43/21 ojat 2,5 %	Ojanen ym. 2010, 2019 + julkaisemat Ojanen ym. 2010, 2019 + julkaisemat
Metsä	kiv.	-0,20	4,00	4	Dalal & Allen 2008
Turvermaan pelto	käytössä entinen	1 0,44	0,43 0,14	11/6 ojat 1 % 14/5 ojat 1 %	Maljanen ym. 2003a, 2004, 2010, Regina ym. 2007, Hiraishi ym. 2014 (ojat) Maljanen ym. 2001a, 2013, Mäkitranta ym. 2007, Kløve ym. 2010, Hiraishi ym. 2014 (ojat)
Pello	kiv.	-0,05	0,05	21	Regina ym. 2018
Turvesuo		1,96		ojat 7 %, sarka 93 %	Pohjala 2014
Maankäyttö	N ₂ O-päästö	kv	n	Huom	Lähteet
	rehevä	0,11	0,02	17	Minkkinen ym. 2020
Ojittamaton suo	karu	0,1	0,02	11	Minkkinen ym. 2020
Metsäojitettu	rehevä	0,23	0,04	27	Minkkinen ym. 2020
	karu	0,08	0,03	26	Minkkinen ym. 2020
Metsä	kiv.	0,04	0,03	4	Dalal & Allen 2008
Turvermaan pelto	käytössä entinen	1,7 1,2	0,4 0,3	13 17	Maljanen ym. 2003b, 2004, 2009, 2010, Regina ym. 2007 Maljanen ym. 2001a, 2012, 2013, Mäkitranta ym. 2007, Phlatie ym. 2004, Kløve ym. 2010
Pello	kiv.	0,5	0,3	51	Regina ym. 2018
Turvesuo		0,1			Pohjala 2014

Taulukko 3. Taulukon 4 kertoimien laskentaan käytetyt Hallitustenvälisen ilmastopaneelin julkaisemat CO₂:n, CH₄:n ja N₂O:n lämmitystehokkuudet (radiative efficiency, RE, 10⁻¹³ W/(m² Maata)/(kg kaasua)), epäsuorien vaikutusten kertoimet (kerroin) ja eliniät ilmakehässä (aikavakio τ , vuosia) (Myhre ym. 2013a, b). CH₄:n lämmitystehokkuuden osalta käytettiin päivitettyä arvoa (Etminan ym. 2016). CO₂-päästö jaettiin neljään osuuteen, joiden eliniät kuvaavat hiilidioksidiä ilmakehästä poistavia eri mekanismeja.

Kaasu	RE	Kerroin	Osuus	τ
CO ₂	0.0176	1	0.2173	∞
	0.0176	1	0.2240	394.4
	0.0176	1	0.2824	36.54
	0.0176	1	0.2763	4.304
CH ₄	1.58	1.53	1	12.4
N ₂ O	3.85	0.93	1	121

Taulukko 4. SGWP (sustained global warming potential) -kertoimet 20, 50, 100 ja 500 vuodelle sekä tavanomaiset GWP₁₀₀-kertoimet. SGWP-kertoimilla kertomalla voidaan CH₄:n ja N₂O:n kyseisen ajanjakson jatkuva vuotuinen päästö muuttaa keskimääräiseltä lämmitysvaikutukseltaan (säteilypakote) vastaavaksi määräksi kyseisen ajanjakson jatkuvaa vuotuista CO₂-päästöä (CO₂-ekvivalentti). Kertoimet on laskettu taulukon 3 parametrien perusteella. Tavanomaiset GWP₁₀₀-kertoimet, jotka perustuvat yhden vuoden kertapäästön lämmitysvaikutuksiin 100 vuoden aikana: Myhre ym. (2013a, b).

Kaasu	20 vuotta	50 vuotta	100 vuotta	500 vuotta	GWP ₁₀₀
CH ₄	113	80	54	19	34
N ₂ O	250	268	270	181	298

Ojittamattomien soiden CO₂-nielun laskenta perustuu soihin jääkauden jälkeen kertyneen hiilen keskimääräiseen kertymisnopeuteen (Turunen ym. 2002). Tämä hiili on kertynyt soihin pääosin suokasvien hiilidioksidin sidonnan kautta, mutta osa hiilestä on tullut laskeumana (0,5 g C/m²/vuosi; Lindroos ym. 2007) ja osa on huuhtoutunut pois suosta veden mukana (DOC-päästö, 9,5 g C/m²/vuosi; Sallantaus 1994). Tästä DOC-päästöstä 90 % arvioidaan päätyvän CO₂-päästönä ilmakehään (Evans ym. 2015, Hiraishi ym. 2014) ja 10 % varastoituu muihin ekosysteemeihin. Lisäksi osa soihin sidotusta hiilestä vapautuu metaanina. CO₂-nielu laskettiin hiilitaseen komponenteista (taulukko 1) ja muunnettiin hiilidioksidiksi seuraavasti:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2\text{-nielu} &= (\text{C-nielu} + 0,1 \times \text{DOC-päästö} \\ &+ \text{CH}_4\text{-C-päästö} - \text{C-laskeuma}) \\ &\times 3,664 [\text{g CO}_2/\text{g C}] \text{ (yhtälö 1)} \end{aligned}$$

Ojittamattomilla soilla on myös suoraan mitattu nykyistä CO₂-nielua (esim. Aurela ym. 2004, 2007, Roulet ym. 2007, Drewer ym. 2010). Tulokset ovat samaa kokoluokkaa tässä työssä käytettyjen arvojen (taulukko 1) kanssa. Suoria mittauksia on kuitenkin vain yksittäisiltä soilta, joten ne eivät edusta tasapainoisesti erilaisia

suotyyppejä. Lisäksi tuloksissa on huomattavaa, säästä johtuvaa vaihtelua yksittäisten vuosien välillä. Näistä syistä kattavista hiilitaseaineistoista (Turunen ym. 2002) saadaan vakaampia ja edustavampia arvioita CO₂-nielusta.

Ojitettujen soiden maaperän CO₂-päästöt perustuvat paikan päällä tehtyihin CO₂-mittauksiin ja niiden pohjalta tehtyihin laskelmiin. Lähteinä on käytetty kotimaisia ja yksittäisiä muita pohjoismaisia tutkimuksia, joista on voitu luotettavasti laskea nykyistä tilannetta vastaava vuotuinen CO₂-päästö. CO₂-päästöön on lisätty 90 % DOC-päästön sisältämästä hiilestä (DOC-päästö (g C/m²/vuosi): metsäojitetut 10,5 (Sallantaus 1994); pellot 15,1 (Myllys 2019); turpeennoisto 13,5 (Kangasluoma ym. 2013)). Metsäojitetuilla soilla on otettu huomioon myös latvussadantana maaperään päätyvä ilmakehästä sidottu hiili (= sateen latvuksista maahan huuhteleva hiili ja C-laskeuma, 2,5 g C/m²/vuosi; Lindroos ym. 2007). Pelloilla on otettu huomioon, että se osa ilmakehästä sidotusta hiilestä, joka viedään pois pellolta satona, ei päädy kartuttamaan maaperän hiilivarastoa. Samoin metsäojitetuilla soilla puiden kasvaessa niihin kertyvä hiili ei kartuta maaperän hiilivarastoa.

Ojitettujen soiden hiilidioksiditasetta ei voi arvioida samalla menetelmällä kuin ojittamatto-

mien, koska suot ovat olleet ojitettuja vain hyvin pienen osan historiastaan. Metsäojitetuilta soilta on kuitenkin olemassa ojituksen jälkeiseen maaperän hiilivaraston muutokseen perustuvia arviota maaperän hiilitaseista (Minkkinen & Laine 1998, Minkkinen ym. 1999, Simola ym. 2012, Krüger ym. 2016). Niiden tuloksia ei ole hyödynnetty tässä työssä, koska ne eivät kuvaa tämänhetkistä tilannetta (metsäojitetut suot ovat vähitellen muuttuneet ojituksen käynnistämisen sukkession myötä) ja toisaalta tämänhetkistä tilannetta kuvaavia kaasutasemittauksia on hyvin saatavilla. Hiilitasetutkimusten tulokset ovat kvalitatiivisesti samankaltaisia kaasutasetutkimusten tulosten kanssa: metsäojitetuissa soissa on sekä turvetta menettäviä että turvetta kerryttäviä tapauksia. Hiilitasetutkimusten tulokset ovat kuitenkin ristiriitaisia, mikä viittaa menetelmän epävarmuuteen (Krüger ym. 2016, Laiho ja Pearson 2016): Minkkisen ja Laineen (1998) mukaan maaperän hiilinielu on ojitetuilla vähäravinteisilla kasvupaikoilla moninkertainen verrattuna ojittamattomiin soihin. Simolan ym. (2012) mukaan taas erityisesti vähäravinteiset suot ovat menettäneet ojituksen jälkeen huomattavasti hiiltä. Kaasutasetutkimusten tulokset (Ojanen & Minkkinen 2019) ovat realistisempia: ojitetuilla karuilla soilla hiiltä voi kertyä, mutta ojittamatonta suota hitaammin. Toisaalta mitä rehevämpi ja kuivempi ojitettu suo on, sitä suurempi on hiilen hävikki. Silti hävikki jää niilläkin intensiivisempiä maankäyttömuotoja pienemmäksi (taulukko 2).

Kivennäismaiden metsien ja peltojen maaperän CO₂-päästö perustuu maaperän hiilitase-arvioihin ja on laskettu samaan tapaan kuin luonnontilaisten soiden CO₂-nielu (yhtälö 1). DOC-päästönä (g C/m²/vuosi) on käytetty arvoja: 1,7 (metsät) ja 4,3 (pellot) (ks. Ojittamattomien ja ojitettujen soiden vesistökuormitus).

Metaanipäästö (CH₄) ja typpioksiduulipäästö (N₂O) on kaikissa maankäytöissä mitattu siten, että niissä on mukana maaperän lisäksi kenttä- ja pohjakerroksen kasvillisuuden (varvut, ruohovartiset kasvit ja sammalet) vaikutus. Myös ojien CH₄-päästö on otettu huomioon. Metsäojitetuilla soilla oletetaan olevan ojia 2,5 % pinta-alasta (metrin levyinen oja 40 metrin välein). Pelloista suuri osa on salaojitettuja, ja ojien osuus on keskimäärin vain 1 % (Markus Haakana / Luonnonvarakeskus, alustava arvio,

otanta Valtakunnan metsien inventoinnin pelto-koaloista). Turvetuotannon soilla ojia on 7 % pinta-alasta (Pohjala 2014). Metsäojitetuilla soilla ojan päästö on 6,4 g CH₄ / m² ojaa / vuosi (Ojanen ym. julkaisemattomat aineistot), pelloilla 116,5 g CH₄ / m² ojaa / vuosi ja hylätyillä pelloilla 52,7 g CH₄ / m² ojaa / vuosi (Hiraishi ym. 2014, suomalaisia tutkimuksia ei ole) ja turvesoilla 21,4 g CH₄ / m² ojaa / vuosi (Pohjala 2014).

Kasvihuonekaasutasetta hiilidioksidiekvivalentteina laskettaessa (kuvat 3 ja 4) ja säteilypakotteita laskettaessa (kuva 2) on otettu huomioon eri kaasujen lämmitystehokkuudet ja eliniät ilmakehässä (taulukko 3). Lisäksi on otettu huomioon, että metaanin hajotessa ilmakehässä siitä syntyy hiilidioksidia, jolla on myös lämmittävä vaikutus (ks. esim. Ojanen & Minkkinen 2020). Taulukossa 4 on esitetty ja selitetty SGWP-kertoimet (sustained global warming potential), joiden avulla eri kaasujen taseet on muutettu yhteismitallisiksi CO₂-ekvivalenteiksi (kuvat 3 ja 4).

Metsäojitettujen soiden aineistossa on mukana sekä voimakkaasti kuivuneita, aktiivisessa metsätalouskäytössä olevia alueita, että ojituksen jälkeen märeksi jääneitä tai kuivatuksen ylläpidon puutteen takia vettyneitä alueita. Tämän ansiosta on voitu arvioida kuivatustehon (vedenpinnan syvyyden) vaikutusta maaperän CO₂-, CH₄- ja N₂O-päästöihin (kuva 4). Päästöjen on oletettu riippuvan vedenpinnan syvyydestä Ojasen ym. (2010), Ojasen ja Minkkisen (2019) ja Minkkisen ym. (2020) esittämien empiirisiin aineistoihin sovitettujen tilastollisten mallien mukaisesti.

Kommentoineet: Juha-Pekka Hotanen, Lauri Lindfors, Pekka Punttila, Sakari Rehell, Sakari Sarkkola

Kirjallisuus

- Aurela, M., Laurila, T., Tuovinen, J.-P., 2004. The timing of snow melt controls the annual CO₂ balance in a subarctic fen. *J. Geophys. Res.* 31: L16119. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2004GL020315>
- Aurela, M., Riutta, T., Laurila, T., Tuovinen, J.-P., Vesala, T., Tuittila, E.-S., Rinne, J., Haapanala, S., Laine, J., 2007. CO₂ exchange of a sedge fen in southern Finland – the impact of a drought period. *Tellus* 59B: 337–826.

- Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00309.x>
- Bjarnadottir, B. & Sungur, G.A., Sigurdsson, B.D., Kjartansson, B.T., Oskarsson, H., Oddsdottir, E.S., Gunnarsdottir, G.E & Black, A. 2021. Carbon and water balance of an afforested shallow drained peatland in Iceland. *Forest Ecology and Management* 482: 118861. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118861>
- Couwenberg, J., Dommain, R. & Joosten, H. 2010. Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in south-east Asia. *Global Change Biology* 16: 1715–1732. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02016.x>
- Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bährisch, S., Dubovik, D., Liashchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A. & Joosten, H. 2011. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia* 674: 67–89. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>
- Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change* 3: 51–58. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1633>
- Dalal, R. & Allen, D. 2008. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Turner Review* 18. *Australian Journal of Botany* 56: 369–407. Saatavissa: <https://doi.org/10.1071/BT07128>
- Drewer, J., Lohila, A., Aurela, M., Laurila, T., Minkinen, K., Penttilä, T., Dinsmore, K., McKenzie, R., Helfter, C., Flechard, C., Sutton, M., Skiba, U. 2010. Comparison of greenhouse gas fluxes and nitrogen budgets from an ombrotrophic bog in Scotland and a minerotrophic sedge fen in Finland. *European Journal of Soil Science* 61: 640–650. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01267.x>
- Eickenscheidt, T., Heinichen, J. & Drösler, M. 2015. The greenhouse gas balance of a drained fen peatland is mainly controlled by land-use rather than soil organic carbon content. *Biogeosciences* 12: 5161–5184. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-12-5161-2015>
- Elder, J.W. & Lal, R. 2008. Tillage effects on gaseous emissions from an intensively farmed organic soil in North Central Ohio. *Soil & Tillage Research* 98: 45–55. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.003>
- Etminan, M., Myhre, G., Highwood, E.J. & Shine, K.P. 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters* 43(12): 614–623. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/2016GL071930>
- Evans, C., Renou-Wilson, F. & Strack, M. 2015. The role of waterborne carbon in the greenhouse gas balance of drained and re-wetted peatlands. *Aquatic Sciences* 78: 573–590. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0447-y>
- Frolking, S. & Roulet, N. 2007. Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions- *Global Change Biology* 13: 1079–1088. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01339.x>
- Frolking, S., Roulet, N. & Fuglestedt, J. 2006. How northern peatlands influence the Earth's radiative budget: Sustained methane emission versus sustained carbon sequestration. *Journal of Geophysical Research* 111: G01008. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2005JG000091>
- Grönlund, A., Hauge, A., Hovde, A. & Rasse, D.P. 2008. Carbon loss estimates from cultivated peat soils in Norway: a comparison of three methods. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 81: 157–67. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9171-5>
- Heikkinen, J., Ketoja, E., Nuutinen, V. & Regina, K. 2013. Declining trend of carbon in Finnish cropland soils in 1974–2009. *Global Change Biology* 19: 1456–1469. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/gcb.12137>
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (toim.) 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland. Saatavissa: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html>
- Hooijer, A., Page, S.E., Canadell, J.G., Silvius, M., Kwadijk, J., Wösten, H. & Jauhiainen, J. 2010. Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences* 7: 1505–1514. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-7-1505-2010>
- Hooijer, A., Page, S.E., Jauhiainen, J., Lee, W.A., Lu, X.X., Idris, A. & Anshari, G. 2012. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences* 9: 1053–1071. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-9-1053-2012>

- vissa: <https://doi.org/10.5194/bg-9-1053-2012>
- Jolly, W. M., Cochrane, M., Freeborn, P., Holden, Z., Brown, T., Williamson, G., & Bowman, D. 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications* 6: 7537. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>
- Juutinen, A., Saarimaa, M., Ojanen, P., Sarkkola, S., Haara, A., Karhu, J., Nieminen, M., Minkkinen, K., Penttilä, T., Laatikainen, M. & Tolvanen, A. 2019. Trade-offs between economic returns, biodiversity, and ecosystem services in the selection of energy peat production sites. *Ecosystem Services* 40: 101027. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.101027>
- Juutinen, A., Tolvanen, A., Saarimaa, M., Ojanen, P., Sarkkola, S., Ahtikoski, A., Haikarainen, S., Karhu, J., Haara, A., Nieminen, M., Penttilä, T., Nousiainen, H., Hotanen, J-P., Minkkinen, K., Kurttila, A., Heikkinen, K., Sallantausta, T., Aapala, K. & Tuominen, S. 2020. Cost-effective land-use options of drained peatlands – integrated biophysical-economic modeling approach. *Ecological Economics* 175: 106704. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106704>
- Kangasluoma, M., Nikula, A., Leskela, A., Sillanpää, J. & Kainua, K. 2013. Vapo Oy. Turvetuotantoalueiden vesistökuormituksen arviointi – Vedenlaatu- ja kuormitustarkastelu vuosien 2003–2011 tarkkailuaineistojen perusteella. Pöyry Finland Oy. 65 s. + liitteet. Saatavissa: https://www.vapo.com/filebank/1706-Poyry_Ominaiskuormitus selvitys_230413.pdf
- Kløve, B., Berglund, K., Berglund, Ö., Weldon, S., & Maljanen, M. 2017. Future options for cultivated Nordic peat soils: Can land management and rewetting control greenhouse gas emissions? *Environmental Science & Policy* 69: 85–93. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.12.017>
- Kløve, B., Sveistrup, T. & Hauge, A. 2010. Leaching of nutrients and emission of greenhouse gases from peatland cultivation at Bodin, Northern Norway. *Geoderma* 154: 219–232. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.022>
- Krüger, J., Alewell, C., Minkkinen, K., Szidat, S. & Leifeld, J. 2016. Calculating carbon changes in peat soils drained for forestry with four different profile-based methods. *Forest Ecology and Management* 381: 29–36. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.09.006>
- Laiho, R. & Pearson, M. 2016. Surface peat and its dynamics following drainage – do they facilitate estimation of carbon losses with the C/ash method? *Mires and Peat* 17(8): 1–19. Saatavissa: <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.247>
- Laine, J., Vasander, H., Hotanen, J-P., Nousiainen, H., Saarinen, M., Penttilä, T. 2018. Suotyypit ja turvekankaat – kasvupaikkaopas. Metsäkustannus Oy. 160 s.
- Leppelt, T., Dechow, R., Gebbert, S., Freibauer, A., Lohila, A., Augustin, J., Drösler, M., Fiedler, S., Glatzel, S., Höper, H., Järveoja, J., Lærke, P. E., Maljanen, M., Mander, Ü., Mäkiranta, P., Minkkinen, K., Ojanen, P., Regina, K. and Strömberg, M. 2014. Nitrous oxide emission budgets and land-use-driven hotspots for organic soils in Europe. *Biogeosciences* 11: 6595–6612. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-11-513-6595-2014>
- Lindroos, A-J., Derome, J. & Derome, K. 2007. Open area bulk deposition and stand throughfall in Finland during 2001–2004. *Metlan työraportteja* 45: 81–92. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2031-5>
- Lohila, A., Aurela, M., Tuovinen, J-P. & Laurila, T. 2004. Annual CO₂ exchange of a peat field growing spring barley or perennial forage grass. *Journal of Geophysical Research* 109: D18116. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2004JD004715>
- Lohila, A., Laurila, T., Aro, L., Aurela, M., Tuovinen, J-P., Laine, J., Kolari, P. & Minkkinen, K. 2007. Carbon dioxide exchange above a 30-year-old Scots pine plantation established on organic-soil cropland *Boreal Environment Research* 12: 141–157. Saatavissa: <http://www.borenv.net/>
- Lupikis, A. & Lazdins, A. 2017. Soil carbon stock changes in transitional mire drained for forestry in Latvia: a case study. *Forestry and Wood Processing* 2017(1): 55–61. Saatavissa: <https://doi.org/10.22616/rrd.23.2017.008>
- Maljanen, M., Hytönen, J. & Martikainen, P.J. 2001a. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant and Soil* 231: 113–121. Saatavissa: <https://doi.org/10.1023/A:1010372914805>
- Maljanen, M., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Laine,

- J., Minkkinen, K. & Martikainen, P. 2013. Atmospheric impact of abandoned boreal organic agricultural soils depends on hydrological conditions. *Boreal Environment Research* 18: 250–268. Saatavissa: <http://www.borenv.net/>
- Maljanen, M., Komulainen, V.-M., Hytönen, J., Martikainen, P.J. & Laine, J. 2004. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. *Soil biology and Biochemistry* 36: 1801–1808. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.05.003>
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 2003a. Methane fluxes on agricultural and forested boreal organic soils. *Soil Use and Management* 19: 73–79. Saatavissa: <https://doi.org/10.1079/SUM2002171>
- Maljanen, M., Liikanen, A., Silvola, J. & Martikainen, P.J. 2003b. Nitrous oxide emissions from boreal organic soil under different land-use. *Soil Biology & Biochemistry* 35(5): 689–700. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00085-3)
- Maljanen, M., Martikainen, P.J., Walden, J. & Silvola, J. 2001b. CO₂ exchange in an organic field growing barley or grass in eastern Finland. *Global Change Biology* 7: 679–692. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2001.00437.x>
- Maljanen, M., Shurpali, N., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Aro, L., Potila, H., Laine, J., Li, C. & Martikainen, P.J. 2012. Afforestation does not necessarily reduce nitrous oxide emissions from managed boreal peat soils. *Biogeochemistry* 108: 199–218. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9591-1>
- Maljanen, M., Sigurdsson, B.D., Guðmundsson, J., Óskarsson, H., Huttunen, J.T. & Martikainen, P.J. 2010. Greenhouse gas balances of managed peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. *Biogeosciences* 7: 2711–2738. Saatavissa: <https://doi.org/10.5194/bg-7-2711-2010>
- Martikainen, P.J., Nykänen, H., Crill, P., Silvola, J. 1993. Effect of a lowered water-table on nitrous oxide fluxes from northern peatlands. *Nature* 366: 51–53. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/366051a0>
- Mathijssen, P., Kähkölä, N., Tuovinen, J.-P., Lohila, A., Minkkinen, K., Laurila, T. & Välranta, M. 2017. Lateral expansion and carbon exchange of a boreal peatland in Finland resulting in 7000 years of positive radiative forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 122(3): 562–577. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/2016JG003749>
- Mathijssen, P., Tuovinen, J.-P., Lohila, A., Aurela, M., Juutinen, S., Laurila, T., Niemelä, E., Tuittila, E.-S. & Välranta, M. 2014. Development, carbon accumulation, and radiative forcing of a subarctic fen over the Holocene. *The Holocene* 24(9): 1156–1166. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/0959683614538072>
- Minkkinen, K. & Laine, J. 1998. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. *Canadian Journal of Forest research* 28: 1267–1275. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/x98-104>
- Minkkinen, K. & Ojanen, P. 2013. Pohjois-Pohjanmaan turvemaiden kasvihuonekaasutaseet. *Metlan työraportteja* 258: 75–111. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2412-2>
- Minkkinen, K., Ojanen, P., Koskinen, M. & Penttilä, T. 2020. Nitrous oxide emissions of undrained, forestry-drained and rewetted boreal peatlands. *Forest Ecology and Management* 478: 118494. 10 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118494>
- Minkkinen, K., Vasander, H., Jauhiainen, S., Karsisto, M. & Laine, J. 1999. Post-drainage changes in vegetation composition and carbon balance in Lakkasuo mire, Central Finland. *Plant and Soil* 207: 107–120. Saatavissa: <https://doi.org/10.1023/A:1004466330076>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. 2013a. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Teoksessa: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (toim.). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Saatavissa: <http://www.climatechange2013.org>*
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque,

- J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., & Zhang, H. 2013b. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing Supplementary Material. Teoksessa: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (toim.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Saatavissa: <http://www.climatechange2013.org>
- Myllys, M. 2019. Turvepeltojen ravinnehuuhtoumien vähentämismahdollisuudet. *Vesitalous* 1/2019: 33–34. Saatavissa: <https://www.vesitalous.fi/>
- Mäkiranta, P., Hytönen, J., Aro, L., Maljanen, M., Pihlatie, M., Potila, H., Shurpali, N., Laine, J., Lohila, A., Martikainen, P.J. & Minkkinen, K. 2007. Soil greenhouse gas emissions from afforested organic soil croplands and cutaway peatlands. *Boreal Environment Research* 12: 159–175. Saatavissa: <http://www.borenav.net/>
- Mäkiranta, P., Laiho, R., Fritze, H., Hytönen, J., Laine, J. & Minkkinen, K. 2009. Indirect regulation of heterotrophic peat soil respiration by water level via microbial community structure and temperature sensitivity. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 695–703. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.01.004>
- Ojanen, P. & Minkkinen, K. 2019. The dependence of net soil CO₂ emissions on water table depth in boreal peatlands drained for forestry. *Mires and Peat* 24(27): 1–8. Saatavissa: <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1751>
- Ojanen, P., Minkkinen, K., Alm, J. & Penttilä, T. 2010. Soil–atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in boreal forestry-drained peatlands. *Forest Ecology and Management* 260: 411–421. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.036>
- Ojanen, P., Penttilä, T., Tolvanen, A., Hotanen, J.-P., Saarimaa, M., Nousiainen, H. & Minkkinen, K. 2019. Long-term effect of fertilization on the greenhouse gas exchange of low-productive peatland forests. *Forest Ecology and Management* 432: 786–798. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.015>
- Pihlatie, M., Rinne, J., Lohila, A., Laurila, T., Aro, L. & Vesala, T. 2004. Nitrous oxide emissions from an afforested peat field using eddy covariance and enclosure techniques. Teoksessa: Päivänen, J. (toim.). *Proceedings of the 12th International Peat Congress. Volume 2. International Peat Society.* s. 1010–1014.
- Pohjala, M. 2014. Mikä on energia- ja kasvu-turpeen elinkaaren ilmastovaikutus? Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, metsätieteiden laitos. 79 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201507212281>
- Regina, K. & Alakukku, L. 2010. Greenhouse gas fluxes in varying soils types under conventional and no-tillage practices. *Soil and Tillage Research* 109: 144–152. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.009>
- Regina, K., Heikkinen, J. & Maljanen, M. 2018. Greenhouse gas fluxes of agricultural soils in Finland. Teoksessa: Shurpali, N., Agarwal, A. & Srivastava, V. *Greenhouse Gas Emissions. Challenges, Technologies and Solutions.* Springer, Singapore. s. 7–22. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3272-2_2
- Regina, K., Nykänen, H., Silvola, J., and Martikainen, P. J. 1996. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity. *Biogeochemistry* 35: 401–418. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/BF02183033>
- Regina, K., Pihlatie, M., Esala, M. & Alakukku, L. 2007. Methane fluxes on boreal arable soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 119: 346–352. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.08.002>
- Regina, K., Sheehy, J. & Myllys, M. 2015. Mitigating greenhouse gas fluxes from cultivated organic soils with raised water table. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20: 1529–1544. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11027-014-9559-2>
- Regina, K., Syväsalö, E., Hannukkala, S. & Esala, M. 2004. Fluxes of N₂O from farmed peat soils in Finland. *European Journal of soil Science* 55: 591–599. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00622.x>
- Rehell, S. 2017. Ilmastotekijöiden ja vesitalouden vaikutus minerotrofisten rimpipintojen esiintymiseen borealisissa suosysteemeissä. *Suo* 68(2–3): 41–66. Saatavissa: <http://www.suo.fi/article/10113>
- Roulet, N.T., Lafleur, P.M., Richard, P.J.H.,

- Moore, T.R., Humphreys, E.R., Bubier, J. 2007. Contemporary carbon balance and late Holocene carbon accumulation in a northern peatland. *Global Change Biology* 13: 397–411. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01292.x>
- Sallantausta, T. 1994. Response of leaching from mire ecosystems to changing climate. Teoksessa: Kanninen, M. (toim.). The Finnish research programme on climate change. Second progress report. Suomen Akatemia. s. 291–296.
- Sallinen, A., Tuominen, S., Kumpula, T. & Tahvanainen, T. 2019. Undrained peatland areas disturbed by surrounding drainage: a large scale GIS analysis in Finland with a special focus on aapa mires. *Mires and Peat* 24(38): 1–22. Saatavissa: <https://doi.org/10.19189/MaP.2018.AJB.391>
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Ahti, E., Koivusalo, H. & Nieminen, M. 2012. Depth of water table prior to ditch network maintenance is a key factor for tree growth response. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27: 649–658. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.689004>
- Shurpali, N., Hyvönen, N., Huttunen, J., Biasi, C., Nykänen, H., Pekkarinen, N & Martikainen, P. 2008. Bare soil and reed canary grass ecosystem respiration in peat extraction sites in Eastern Finland. *Tellus* 60B: 200–209. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2007.00325.x>
- Silvan, N., Sarkkola, S. & Laiho, R. 2019. Rahkasammalbiomassa ja sen korjuuseen soveltuvat suot Suomessa. *Suo* 70(2–3): 41–53. Saatavissa: <http://suo.fi/article/10319>
- Silvola, J., Alm, J., Ahlholm, U., Nykänen, H. & Martikainen, P. 1996. CO₂ fluxes from peat in boreal mires under varying temperature and moisture conditions. *Journal of Ecology* 84: 192–228. Saatavissa: <https://www.jstor.org/stable/2261357>
- Simola, H., Pitkänen, A. & Turunen, J. 2012. Carbon loss in drained forestry peatlands in Finland, estimated by re-sampling peatlands surveyed in the 1980s. *European Journal of Soil Science* 63: 798–807. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01499.x>
- Sirin, S., Medvedeva, M., Maslov, A. & Vozbrannaya, A. 2018. Assessing the Land and Vegetation Cover of Abandoned Fire Hazardous and Rewetted Peatlands: Comparing Different Multispectral Satellite Data. *Land* 7(2): 71. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/land7020071>
- Säurich, A., Tiemeyer, B., Don, A., Fiedler, S., Bechtold, M., Arnelung, W. & Freibauer, A. 2019. Drained organic soils under agriculture – The more degraded the soil the higher the specific basal respiration. *Geoderma* 355: 113911. 12 s. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113911>
- Tahvanainen, T. 2011. Abrupt ombrotrophication of a boreal aapa mire triggered by hydrological disturbance in the catchment. *Journal of Ecology* 99: 404–415. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01778.x>
- Tiemeyer, B., Albiac Borraz, E., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Drösler, M., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Freibauer, A., Giebel, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Leiber-Sauheitl, K., Peichl-Brak, M., Roßkopf, N., Sommer, M. & Zeitz, J. 2016. High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology* 22: 4134–4149. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/gcb.13303>
- Tilastokeskus 2019. Greenhouse gas emissions in Finland 1990 to 2017. National Inventory Report under the UNFCCC and the Kyoto Protocol. Submission to the European Union. 11 April 2019. 566 s. Saatavissa: <https://unfccc.int/documents/194637>
- Tuittila, E.-S., Komulainen, V.-M., Vasander, H. & Laine, J. 1999. Restored cut-away peatland as a sink for atmospheric CO₂. *Oecologia* 120: 563–574. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s004420050891>
- Turetsky, M., Amiro, B., Bosch, E. & Bhatti, J. 2004. Historical burn area in western Canadian peatlands and its relationship to fire weather indices. *Global Biogeochemical Cycles* 18: GB4014. Saatavissa: <https://doi.org/10.1029/2004GB002222>
- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K. & Reinikainen, A. 2002. Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland-application to boreal and subarctic regions. *The Holocene* 12(1): 69–80. Saatavissa: <https://doi.org/10.1191/0959683602hl522rp>